

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-266004

(43) 公開日 平成11年(1999) 9月28日

(51) Int.Cl.⁸

識別記号

F I

H 0 1 L 29/06

H 0 1 L 29/06

33/00

33/00

A

H 0 1 S 3/18

H 0 1 S 3/18

審査請求 未請求 請求項の数12 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願平10-66899

(22) 出願日 平成10年(1998) 3月17日

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号

(72) 発明者 杉山 芳弘

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(74) 代理人 弁理士 伊東 忠彦

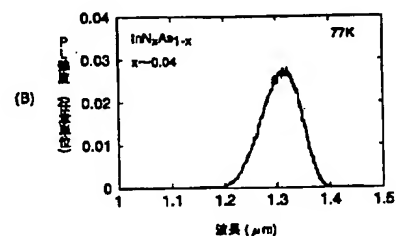
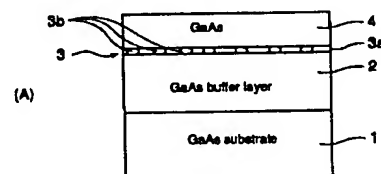
(54) 【発明の名称】 量子半導体装置および量子半導体発光装置

(57) 【要約】

【課題】 量子ドットを含み、1.3 μm 帯で鋭いエネルギースペクトルを示す量子半導体装置を提供することにある。

【解決手段】 基板上に、基板に対して歪み系を形成するNを含むヘテロエピタキシャル構造を、中間層を挟みながら交互に繰り返し堆積し、垂直方向に整列した一連のInNAs系量子ドットを形成し、その際、量子ドット中のNの量を、量子ドットが1.3 μm 帯のエネルギースペクトルを有するように設定する。

(A)、(B)は本発明の原理を示す図



【特許請求の範囲】

【請求項1】 半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子半導体装置において、

前記量子構造は：第1の格子定数を有する第1の半導体結晶よりなり、互いに繰り返して積層された複数の中間層と；各々の中間層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数を有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する第2の半導体結晶よりなり、各々前記中間層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとを含み、

前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットは、隣接する中間層中の対応する量子ドットと、前記半導体基板の主面に垂直な方向に、実質的に整列し、

前記複数の中間層の各々はキャリアのBohr半径以下の厚さに厚さを設定されており、

前記第2の半導体結晶はNを含むことを特徴とする量子半導体装置。

【請求項2】 前記複数の中間層の各々は、前記量子ドットが自由成長した場合に有する高さよりも実質的に小さい厚さを有することを特徴とする請求項1記載の量子半導体装置。

【請求項3】 前記整列した複数の量子ドットは、量子力学的に結合して、実質的に1.3μm帯あるいはより長波長の光と相互作用をする、実質的に単一の量子ドットを形成することを特徴とする請求項1または2記載の量子半導体装置。

【請求項4】 前記複数の量子ドットの各々はInNAsよりなり、前記複数の中間層の各々はGaAsよりなることを特徴とする請求項1～3のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置。

【請求項5】 前記InNAsは、組成を $\text{InN}_x\text{As}_{1-x}$ と表した場合、組成パラメータxが約0.03～0.04であることを特徴とする、請求項1～4のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置。

【請求項6】 半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子半導体装置において、

前記量子構造は：第1の格子定数を有する第1の半導体結晶よりなる中間層と；前記中間層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数を有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する第2の半導体結晶よりなり、各々前記中間層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとを含み、

前記複数の中間層の各々はキャリアのBohr半径以下の厚さに厚さを設定されており、

前記第2の半導体結晶はNを含むことを特徴とする量子半導体装置。

【請求項7】 半導体基板と；前記半導体基板上に形成された第1のクラッド層と；前記第1のクラッド層上に

形成され、量子構造を含む活性層と；前記活性層上に形成された第2のクラッド層と；前記半導体基板上に形成され、前記第1のクラッド層を介して第1の導電型のキャリアを前記活性層に注入する第1の電極と；前記第2のクラッド層上に形成され、前記第2のクラッド層を介して第2の導電型のキャリアを前記活性層に注入する第2の電極とよりなる量子半導体発光装置において、

前記量子構造は：第1の格子定数を有する第1の半導体結晶よりなり、互いに繰り返して積層された複数の中間層と；各々の中間層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数を有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する第2の半導体結晶よりなり、各々前記中間層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとを含み、

前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットは、隣接する中間層中の対応する量子ドットと、前記半導体基板の主面に垂直な方向に、実質的に整列し、

前記複数の中間層の各々はキャリアのBohr半径以下の厚さに厚さを設定されており、

前記第2の半導体結晶はNを含むことを特徴とする量子半導体発光装置。

【請求項8】 前記複数の中間層の各々は、前記量子ドットが自由成長した場合に有する高さよりも実質的に小さい厚さを有することを特徴とする請求項7記載の量子半導体発光装置。

【請求項9】 前記整列した複数の量子ドットは、量子力学的に結合して、実質的に1.3μm帯あるいはより長波長の光と相互作用をする、実質的に単一の量子ドットを形成することを特徴とする請求項7または8記載の量子半導体発光装置。

【請求項10】 前記複数の量子ドットの各々はInNAsよりなり、前記複数の中間層の各々はGaAsよりなることを特徴とする請求項7～9のうち、いずれか一項記載の量子半導体発光装置。

【請求項11】 前記InNAsは、組成を $\text{InN}_x\text{As}_{1-x}$ と表した場合、組成パラメータxが約0.03～0.04であることを特徴とする、請求項7～10のうち、いずれか一項記載の量子半導体発光装置。

【請求項12】 半導体基板と；前記半導体基板上に形成された第1のクラッド層と；前記第1のクラッド層上に形成され、量子構造を含む活性層と；前記活性層上に形成された第2のクラッド層と；前記半導体基板上に形成され、前記第1のクラッド層を介して第1の導電型のキャリアを前記活性層に注入する第1の電極と；前記第2のクラッド層上に形成され、前記第2のクラッド層を介して第2の導電型のキャリアを前記活性層に注入する第2の電極とよりなる量子半導体発光装置において、

前記量子構造は：第1の格子定数を有する第1の半導体結晶よりなる中間層と；前記中間層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数を有し、前記

第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する第2の半導体結晶よりなり、各々前記中間層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとを含み、前記複数の中間層の各々はキャリアのBohr半径以下の厚さに厚さを設定されており、前記第2の半導体結晶はNを含むことを特徴とする量子半導体発光装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は一般に半導体装置に係り、特に量子ドット構造を有する量子半導体装置に関する。キャリアの閉じ込めのない、いわゆるバルク半導体結晶では、キャリアの状態密度はエネルギーと共に放物線的に、すなわち連続的に増大するが、半導体結晶中にキャリアを1次元的に閉じ込めたいわゆる量子井戸構造では量子準位が出現するため、状態密度が階段状に変化する。かかる階段状の状態密度を有する系では、キャリアの分布はバルク結晶の場合よりも制限されるため、かかる量子井戸構造を例えばレーザダイオード等の光半導体装置に適用した場合、バルク半導体結晶を使った場合よりも幅のせまい鋭いスペクトルが得られ、またレーザダイオード等の発光素子では発光効率が向上する。また、量子井戸構造は、RHETのような共鳴バリアを有する電子素子において、キャリアのエネルギーフィルタとして使われている。

【0002】かかるキャリアの閉じ込めをさらに進めた量子細線構造では、キャリアの2次元的な閉じ込めの結果、状態密度は各階段の下端で最大になるように変化するため、キャリアのエネルギースペクトルはさらに鋭くなる。キャリアの閉じ込めをさらに進めた究極的な量子ドット構造では、キャリアの3次元的な閉じ込めの結果、状態密度は離散的になり、これに伴い、キャリアのエネルギースペクトルは、各量子準位に対応して完全に離散的になる。かかる離散的なエネルギースペクトルを有する系では、系が室温等の熱的励起が存在するような状態にあってもキャリアの遷移が量子準位間で不連続に生じるため、例えば量子ドット構造を有する光半導体装置では、室温においても非常に鋭い発光スペクトルを得ることができる。また、かかる量子ドット構造をRHETのような共鳴バリアを有する電子素子において、キャリアのエネルギーフィルタとして使った場合も、低温のみならず、室温においても非常に鋭いエネルギースペクトルが得られる。

【0003】また、かかる量子ドット構造は、エネルギー緩和のボトルネック問題等、基礎物理学的な興味も持たれている。

【0004】

【従来の技術】従来、量子井戸構造は、MBE法あるいはMOVPE法を使って一對のバリア層の間に非常に薄い量子井戸層を介在させることにより、比較的容易に、

また確実に形成することが可能であった。また、量子細線構造については、階段構造を有するいわゆる傾斜半導体基板を使い、各階段の側縁に沿って厚さおよび幅の狭い半導体層を量子井戸層として成長させる方法、あるいは1次元量子井戸構造を電子ビームリソグラフィ等により形成する方法が提案されている。

【0005】そこで、量子ドット構造についても、このような傾斜基板の段差あるいはキンクを使って形成することが考えられるが、かかる基板表面の段差の制御は困難であり、またかかる量子ドット界面においては元素の混合が生じやすく、界面における組成の急峻な変化が困難である等の問題点が存在する。また、リソグラフィ等のパターニングを使った場合、加工に伴う量子ドットへの実質的な損傷が避けられない。

【0006】これに対し、InAs/GaAs等の歪み系ヘテロエピタキシャル構造において、ヘテロエピタキシャル成長の初期に出現するいわゆるS-K (Stranski-Krastanow) モード成長を利用することにより、基板上に相互に離間した島の形で量子ドット構造を形成することができている。例えば、GaAs基板上に、In組成が0.5程度の格子定数が大きく異なるInGaAs層を数分子層、MBE法により堆積することにより、直径が30~40nmのInGaAsの島がGaAs基板上に形成されることが報告されている (Leonard, D., et al., Appl. Phys. Lett. 63, pp.3203 - 3205, 1993)。また、ALE法を使って直径が15~20nm程度のInGaAsの島を、GaAs基板上に、100nm程度の間隔で形成できることが報告されている (Mukai, K., et al., Jpn. J. Appl. Phys., 33, pp. L1710 - L1712, 1994)。さらに、MOVPE法によっても、同様な量子ドットを形成できることが知られている (Oshinowo, J., et al., Appl. Phys. Lett. 65, (11), pp.1421 - 1423 (1994))。

【0007】かかる歪み系ヘテロエピタキシャル構造における量子ドットの形成は、ヘテロ界面に生じる歪みエネルギーに支配されるため、従来の量子ドット構造の形成に比べてはるかに簡単であり、また電子ビームリソグラフィ等によるパターニングを行なうわけでもないで、形成された量子ドットが製造プロセスにより損傷を受けることもない。かかる量子ドットに対してはフォトルミネッセンス (PL) も測定されており、1.2eV付近において、かなり広がったPLピークが生じるのが確認されている (Leonard, D., et al., op cit.)。

【0008】かかる従来のS-Kモードを使った量子ドットでは、先にも説明したように、PL強度は比較的強いものの、そのスペクトル半値幅 (FWHM: Full Width at Half Maximum) が典型的には80~100meV程度の範囲に広がってしまう問題が生じるが、これは量子ドットの大きさの制御が十分にできていないためであると考えられる。また、かかる量子ドットのPL波長は

1. $1\ \mu\text{m}$ 程度であり、光通信あるいは光情報処理で一般的に使われている $1.3\ \mu\text{m}$ 帯の波長よりも短波長側にずれているが、従来のS-Kモードの量子ドットでは、PL波長を必要に応じて設定することが困難であった。後ほど説明するように、量子ドットの大きさ自体は堆積温度を制御することである程度は制御することができるが、個々の量子ドットで大きさかなりのばらつきが生じるのは避けられない。かかる量子ドットの大きさのばらつきが、PLスペクトルの拡がりに結びついているものと考えられる。また、かかる従来の量子ドット構造では、発光に関与しない量子ドットもかなり含まれていると考えられる。

【0009】最近になって、Farad 他 (Farad, S. et al., Appl. Phys. Lett. 68(7), pp.991 - 993, February 12, 1996)は、InP基板上に格子整合して堆積されたAlInAsバッファ層上のInAsよりなるS-Kモード量子ドットについて、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯のPL波長を報告している。しかし、この報告においても、PLスペクトルのFWHMは 110meV 以上あり、個々の量子ドットの波長制御に実質的な課題が残っていることを示している。

【0010】このように、従来のS-Kモードの量子ドットでは、応用上重要な $1.3\ \mu\text{m}$ 帯あるいは $1.5\ \mu\text{m}$ 帯において鋭い発光ピークを得ることができず、実用的な光半導体装置を構成することができなかった。また、RHETのような電子装置においても同様な問題が生じていた。すなわち、従来のS-Kモードの量子ドットをこのようなRHETの共鳴トンネルバリアとして使った場合、得られるエネルギーフィルタの特性が悪く、所望の鋭い共鳴トンネル効果が得られない。

【0011】これに対し、本発明の発明者は、先に、かかるS-Kモードの量子ドットが形成された量子ドット構造上に、前記量子ドットを埋め込むように、基板と格子整合する中間層を形成し、かかる中間層上にさらにS-Kモードで量子ドットを形成した場合、上層の量子ドットが下層の量子ドット上に整列する現象を発見し (Sugiyama, Y., et al., Jpn. J. Appl. Phys. 35, Part 1, No.2B, pp.365 - 369, February, 1996)、この発見に基づいて、半導体基板と、前記半導体基板上に形成された量子構造を含む活性層とよりなり、前記量子構造を、第1の格子定数を有する第1の半導体結晶よりなり互いに繰り返し積層された複数の中間層と、各々の中間層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数を有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する第2の半導体結晶よりなり各々前記中間層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとにより構成し、その際、前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットを、隣接する中間層中の対応する量子ドットと、前記半導体基板の主面に垂直な方向に実質的に整列させ、さらに前記複数の中間層の各々の厚さ

を、キャリアのBohr半径以下の厚さ、特に前記量子ドットが自由成長した場合に有する高さよりも実質的に小さい厚さに設定した、新規な量子半導体装置を提案した。特開平9-326506号公報を参照。

【0012】かかる量子ドットの整列は、下層の量子ドットを埋め込んだ中間層中に前記量子ドットに対応して歪みが蓄積され、上層の量子ドットを構成する半導体層をかかる中間層上に堆積する際に、中間層のうち、かかる歪みが蓄積された部分に上層の量子ドットを構成する原子が集まるために生じるものと考えられる。整列した量子ドットは互いに量子力学的に結合し、実質的に単一の、大きな、かつ大きさの揃った量子ドットを構成する。

【0013】図7は、かかる量子ドットが基板主面に対して垂直方向に整列した積層量子構造の例を概略的に示す。図7を参照するに、図示の積層量子構造3は、GaAs基板1の(100)面上に厚さ 400nm で形成されたGaAsバッファ層2上に形成され、前記バッファ層2上に繰り返し積層されたGaAs中間層3aを含み、各々の中間層3a中には、InAsよりなる複数の量子ドット3bが、相互に離散して形成されている。

【0014】このようにしてGaAsバッファ層2上に堆積されたInAs層は、層2に対して7%程度異なる格子定数を有するため、歪み系ヘテロエピタキシャル構造を形成する。かかる歪み系ヘテロエピタキシャル構造においてInAs層のエピタキシャル層を成長させる場合には、先にも説明したように、成長の初期にS-KモードによるInAsの島状成長が生じ、その結果量子ドット3bを構成するInAsの島が多数、前記バッファ層2の表面に形成される。

【0015】図示の構造では、さらにGaAs中間層3aが島3bを埋めるようにさらに堆積され、島3bの形成および中間層3aの堆積が繰り返される。各々の島3bは、典型的には 20nm 程度の径と 5nm 程度の高さを有し、バンドギャップの大きい中間層3aで囲まれることにより、キャリアを3次元的に閉じ込める量子ドットを形成する。

【0016】かかる量子ドットの整列は、中間層3aを図7に示すように繰り返し堆積する際、中間層3aのうち、量子ドット3bを覆う部分に、格子不整合に伴う歪みが蓄積し、従って第2層目、第3層目等の量子ドット3bを形成する際、下層の中間層3aのうち、かかる下層の量子ドット3bを覆う部分に選択的にInAsの島状成長が生じるために形成されると理解される。

【0017】

【発明が解決しようとする課題】図8(A), (B)は、図7の積層量子構造3において、GaAsよりなる中間層3aおよびInAsよりなる量子ドット3bをそれぞれ1層および5層積層した構造について、 77K でのフォトルミネッセンス(PL)スペクトルを測定した

結果を示す。

【0018】図8(A)を参照するに、量子ドット3bを1層積層しただけの構造では、PLスペクトル強度は低く、また非常に広がっており、個々の量子ドット3bの大きさにかんがりのばらつきがあることが示唆される。また、発光の中心波長も1.1 μ mよりも短波長側にあり、このままでは、1.3 μ m帯あるいは1.5 μ m帯を使う光通信装置あるいは光情報処理装置に使えないことがわかる。

【0019】これに対し、図8(B)に示したように中間層3aおよび量子ドット3bを5層積層した場合には、PLスペクトル強度は非常に高くなり、また、ピーク波長もやや短波長側にシフトする。これは、積層された複数の量子ドット3bが量子力学的に結合して実効的に単一の量子ドットを形成することを示唆するが、この場合にも、PL発光波長は1.2 μ m程度が上限で、それ以上に波長を増大させ、例えば1.3 μ m帯の発光波長を得ようとする、積層数が非常に多くなり、工程上困難である。

【0020】そこで、本発明は上記の課題を解決した、新規で有用な量子半導体装置を提供することを概括的課題とする。本発明のより具体的な課題は、自己組織化した量子ドットを含み、1.3 μ m帯あるいはより長波長の帯域で動作する量子半導体装置を提供することにある。

【0021】

【課題を解決するための手段】本発明は、上記の課題を、請求項1に記載したように、半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子半導体装置において、前記量子構造は：第1の格子定数を有する第1の半導体結晶よりなり、互いに繰り返し積層された複数の中間層と；各々の中間層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数を有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する第2の半導体結晶よりなり、各々前記中間層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとを含み、前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットは、隣接する中間層中の対応する量子ドットと、前記半導体基板の主面に垂直な方向に、実質的に整列し、前記複数の中間層の各々はキャリアのBohr半径以下の厚さに厚さを設定されており、前記第2の半導体結晶はNを含むことを特徴とする量子半導体装置により、または請求項2に記載したように、前記複数の中間層の各々は、前記量子ドットが自由成長した場合に有する高さよりも実質的に小さい厚さを有することを特徴とする請求項1記載の量子半導体装置により、または請求項3に記載したように、前記整列した複数の量子ドットは、量子力学的に結合して、実質的に1.3 μ m帯あるいはより長波長の光と相互作用をする、実質的に単一の量子ドットを形成することを特徴とする請求項1または2記載の

量子半導体装置により、または請求項4に記載したように、前記複数の量子ドットの各々はInNAsよりなり、前記複数の中間層の各々はGaAsよりなることを特徴とする請求項1～3のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項5に記載したように、前記InNAsは、組成をInN_xAs_{1-x}と表した場合、組成パラメータxが約0.04であることを特徴とする、請求項1～4のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項6に記載したように、半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子半導体装置において、前記量子構造は：第1の格子定数を有する第1の半導体結晶よりなる中間層と；前記中間層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数を有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する第2の半導体結晶よりなり、各々前記中間層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとを含み、前記複数の中間層の各々はキャリアのBohr半径以下の厚さに厚さを設定されており、前記第2の半導体結晶はNを含むことを特徴とする量子半導体装置により、または請求項7に記載したように、半導体基板と；前記半導体基板上に形成された第1のクラッド層と；前記第1のクラッド層上に形成され、量子構造を含む活性層と；前記活性層上に形成された第2のクラッド層と；前記半導体基板上に形成され、前記第1のクラッド層を介して第1の導電型のキャリアを前記活性層に注入する第1の電極と；前記第2のクラッド層上に形成され、前記第2のクラッド層を介して第2の導電型のキャリアを前記活性層に注入する第2の電極とよりなる量子半導体発光装置において、前記量子構造は：第1の格子定数を有する第1の半導体結晶よりなり、互いに繰り返し積層された複数の中間層と；各々の中間層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数を有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する第2の半導体結晶よりなり、各々前記中間層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとを含み、前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットは、隣接する中間層中の対応する量子ドットと、前記半導体基板の主面に垂直な方向に、実質的に整列し、前記複数の中間層の各々はキャリアのBohr半径以下の厚さに厚さを設定されており、前記第2の半導体結晶はNを含むことを特徴とする量子半導体発光装置により、または請求項8に記載したように、前記複数の中間層の各々は、前記量子ドットが自由成長した場合に有する高さよりも実質的に小さい厚さを有することを特徴とする請求項6記載の量子半導体発光装置により、または請求項9に記載したように、前記整列した複数の量子ドットは、量子力学的に結合して、実質的に1.3 μ m帯あるいはより長波長の光と相互作用をする、実質的に単一の量子ドットを形成することを特徴とする請求項7または8記載の量子半導体発光

装置により、または請求項10に記載したように、前記複数の量子ドットの各々はInNAsよりなり、前記複数の中間層の各々はGaAsよりなることを特徴とする請求項7～9のうち、いずれか一項記載の量子半導体発光装置により、または請求項11に記載したように、前記InNAsは、組成を $\text{InN}_x\text{As}_{1-x}$ と表した場合、組成パラメータ x が約0.04であることを特徴とする、請求項7～10のうち、いずれか一項記載の量子半導体発光装置により、または請求項12に記載したように、半導体基板と；前記半導体基板上に形成された第1のクラッド層と；前記第1のクラッド層上に形成され、量子構造を含む活性層と；前記活性層上に形成された第2のクラッド層と；前記半導体基板上に形成され、前記第1のクラッド層を介して第1の導電型のキャリアを前記活性層に注入する第1の電極と；前記第2のクラッド層上に形成され、前記第2のクラッド層を介して第2の導電型のキャリアを前記活性層に注入する第2の電極とよりなる量子半導体発光装置において、前記量子構造は：第1の格子定数を有する第1の半導体結晶よりなる中間層と；前記中間層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数を有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する第2の半導体結晶よりなり、各々前記中間層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとを含み、前記複数の中間層の各々はキャリアのBohr半径以下の厚さに厚さを設定されており、前記第2の半導体結晶はNを含むことを特徴とする量子半導体発光装置により、解決する。

【作用】図9は、GaInNAs系を含むIII-V族化合物半導体材料の格子定数とバンドギャップエネルギーとの関係を示す(Kondow, M., et al., IEEE J. SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS VOL.3, NO3, JUNE 1997)。

【0022】図9を参照するに、格子定数が5.654ÅのGaAsにおいて少量のNがAsを置き換えると格子定数は減少し、またGaAs-GaN系に特有なバンドギャップエネルギーの下方へのボウイングにより、バンドギャップエネルギーも減少する。また、同様にInAs-InN系においても、InN自体は、立方晶系で閃亜鉛型のInAsに対して六方晶系でウルツ鉱型の結晶構造を有するが、Nの濃度が低い領域では閃亜鉛型の構造を維持し、バンドギャップエネルギー E_g が、系の組成を $\text{InN}_x\text{As}_{1-x}$ と表した場合、式 $E_g(x) = 0.36 + 1.53x + 4.2x(1-x)$ により変化する。

【0023】従って、前記InAs量子ドットを例えば10層積層した構造においては77KでのPLエネルギーが、1.16μmの波長に対応する約1.07eV程度までしか減少しないのに対し、PLエネルギーを1.3μmの波長に対応する0.954eVまで減少させるに

は、前記バンドギャップエネルギー E_g をさらに0.114eVだけ減少させればよい。このためには、前記Nの組成パラメータ x を0.0449に設定すればよい。また、室温ではバンドギャップエネルギーは77Kにおけるよりも減少するため、前記組成パラメータ x は約0.03程度になる。

【0024】ところで、従来より、GaInNAsあるいはGaInAs系のN含有化合物半導体材料では、GaAs基板上に格子整合するようにその組成を制御することが研究されている。例えば(Kondow 他、前出)を参照。しかし、本発明における量子ドットは歪み系におけるS-Kモード成長により形成されるものであり、従って基板との間の格子不整合が存在することが前提となる。一方、図9よりわかるように、GaAsあるいはInAs等のIII-V族化合物半導体においてNがAsを置換すると格子定数は減少する傾向にあり、従ってInAsにおいてNを導入した場合、InAsドットとGaAs基板との間の格子不整合は減少する傾向を示す。しかし、導入されるNの量が前記組成パラメータ x にして0.03～0.04の範囲では、S-K成長に必要な格子不整合が維持される。

【0025】図1(A)、(B)および図2(A)、

(B)は、本発明による量子半導体装置の原理を示す。ただし、図中、先に説明した部分に対応する部分には同一の参照符号を付し、説明を省略する。図1(A)を参照するに、バッファ層2上には単層の量子ドット3bが形成され、さらに前記単層の量子ドット3bを覆うように、単層のGaAs中間層3aが形成される。さらに、前記量子ドット3bおよび中間層3aよりなる量子構造3を覆うように、GaAsキャップ層4が形成される。

【0026】図1(A)の構造では、図7に示した従来の構造に対し、前記量子ドット3bをInAsの代わりに約4%のNを含んだInNAsにより置き換える。InNAsを使うことにより、バンドギャップ E_g が上式に従って減少し、その結果量子ドット3bが相互作用する光の波長が長くなる。図1(B)は図1(A)の量子半導体装置の77KにおけるPLスペクトルを示す。

【0027】図1(B)を参照するに、前記量子ドット3bにNを原子比で約4%含ませることにより、PL強度のピークが77Kにおいて約1.3μmになることがわかる。これに対し、図2(A)の構造では、前記InNAsよりなる量子ドット3bを含む中間層3aを複数(m層)積層する。その際、前記中間層3aの厚さdを、前記量子ドット3bを自由成長させた場合の高さよりも薄く設定することにより、多数の量子ドット3bを、基板1の主面に垂直な方向に整列させることが可能になる。

【0028】図2(A)の構造においても、前記量子ドット3b中にNを約4%導入することにより、図2

(B)に示すようにPL波長を77Kにおいて約1.3

7 μm 程度まで増大させることができる。ただし、図2 (B)の結果は、図2 (A)の構造において、前記中間層3 aの厚さdを3 nmに設定した場合についてのものである。

【0029】一般にIII-V族化合物半導体においてNを少量導入すると半導体結晶の結晶性が劣化するが、図2 (B)の結果を見ると、図2 (A)の積層量子構造3において1.3 μm 帯の波長を実現するには、前記4 %よりもはるかに少ない量のNの導入で十分で、従って、上記積層量子構造3を使うことにより、Nの導入に伴う結晶性の低下による発光効率の低下の問題を効果的に回避することができるのがわかる。例えば、図2

(A)の量子ドット3 bを5層積層した構造においてはNを原子比で2~3%、好ましくは約2.5%導入することで、前記1.3 μm 帯の発光波長を得ることができる。

【0030】

【発明の実施の形態】以下、本発明を好ましい実施例について、詳細に説明する。

【第1実施例】図3は、本発明の第1実施例による発光ダイオード20の構成を示す。図3を参照するに、発光ダイオード20は、(100)面で画成されたn⁺型GaAs基板21上に形成され、前記GaAs基板21上に典型的には400~500 nmの厚さで堆積されたn⁺型GaAsバッファ層22と、前記バッファ層22上に、典型的には300 nmの厚さで形成されたn⁺型AlGaAsよりなる下側クラッド層23と、前記クラッド層23上に典型的には100 nmの厚さに形成されたn型GaAsよりなる下側導波層24とを含む。さらに、導波層24上には、積層量子構造の一部を構成する非ドープGaAs層25が、20 nmの厚さに形成される。

【0031】層22~25は、例えばMBE法により、620°Cの基板温度で形成される。その際、堆積した層からのAsの離脱を防ぐため、堆積を行なう反応容器内のAs圧を 6×10^{-6} Torrに設定するのがよい。層25が形成された後、Gaの供給を遮断して基板温度を例えば510°Cまで下げる。さらに、前記510°Cの基板温度において前記反応容器中にInおよびAsの分子ビームをN₂プラズマと共に導入し、2分子層分の非ドープInNaAs層を、前記GaAs層25上に堆積する。かかる堆積に引き続きさらに約30秒間のアニールを行うことにより、先にも説明したように、堆積されたInNaAsは、GaAs層25上において、径が約20 nm、高さが約5 nmの、相互に離間した成長島26 bを形成する。前記InNaAs層の堆積は、例えばKondow, M., et al., IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, vol.3, no.3, June 1997, pp.719-730に記載の方法により実行することができる。

【0032】このようにして第1層目のInNaAs島2

6 bが形成された後、前記GaAs層25上には、前記InNaAs島26 bを覆うように、厚さが2~3 nmの非ドープGaAsよりなる第1層目の中間層26 aを堆積する。かかる堆積の結果、厚さが2~3 nmのGaAs層26 a中に径が約20 nm、高さが約2~3 nmのInNaAs量子ドット26 bが分散した量子構造が得られる。かかる中間層26 aの堆積に伴い、先に自由成長していたInNaAs島26 bは変形し、高さが中間層26 aの厚さに実質的に等しい2~3 nmに減少する。

【0033】さらに、前記InNaAs島26 bの形成と前記中間層26 aの堆積を例えば4回繰り返し、InNaAs島26 bが上下に整列した積層量子構造26が、図7の積層量子構造3の場合と同様に得られる。かかる堆積の繰り返しの結果、積層量子構造26は、約20 nmの厚さに形成される。積層量子構造26は、発光ダイオードの活性層を形成する。

【0034】このような、中間層26 aの厚さが自由成長したInNaAs島26 bの高さよりも小さい積層量子構造26では、量子ドット26 bは、直上の別の量子ドット26 bと直接に接している可能性がある。ただし、この場合でも、量子ドット26 bと直上の別の量子ドット26 bとが融合してしまうことはなく、積層量子構造26の積層構造は維持される。また、量子ドット26 bと直上の別の量子ドット26 bとの間に1~数原子層のGaAsが介在している可能性もある。

【0035】図3の発光ダイオードでは、さらに前記積層量子構造26上に非ドープGaAs層27が堆積され、その上にp型GaAsよりなる上側導波層28およびp⁺型AlGaAsよりなる上側クラッド層29が、それぞれ120 nmおよび300 nmの厚さに形成され、さらに層29上にp⁺型GaAsよりなるキャップ層30が、50 nmの厚さに形成される。層27~30の形成も、MBE法により行なえばよい。

【0036】さらに、このようにして形成された積層半導体構造に対して、前記GaAsバッファ層22が露出するまでメサエッチングを行い、形成されたメサ構造上にSiN等の保護膜33を形成した後、バッファ層22上に電極31を、また前記キャップ層30上に電極32を形成する。かかる構成の発光ダイオードでは、互いに量子力学的に結合した量子ドット26 bが基板主面に垂直に整列し、前記InNaAs量子ドット26 bの組成xおよびInN_{0.04}As_{0.96}とすることにより、先に図2 (B)で説明したように、77 Kにおいて波長が1.3 μm の非常に鋭い発光スペクトルを生じる。また、前記量子ドット26 b中のN組成xの値を0.024とすることにより、77 Kで1.3 μm 帯の発光波長が得られる。

【0037】さらに、図3の構成において、図1 (A)に示したように量子ドット26 bを単層形成した場合に、Nの組成xを0.04とすることにより、77 Kで

約 $1.3\mu\text{m}$ の発光波長が得られる。また、かかる量子ドット26bを単層含む量子半導体装置において室温で $1.3\mu\text{m}$ の発光波長を得るためには、前記Nの組成値xを約0.03とすればよい。

【第2実施例】図4は、本発明の第2実施例による端面発光型レーザダイオード40の構成を示す縦断面図である。ただし、図4中、先に説明した部分に対応する部分には同一の参照符号を付し、説明を省略する。またレーザダイオード40の横断面図は、図3のものと実質的に同じであるので省略する。

【0038】図4を参照するに、レーザダイオードの対向する端面には高反射率ミラーMおよび低反射率ミラーARが形成され、その結果、前記積層量子構造26はレーザダイオードの光共振器を形成する。すなわち、垂直に整列した量子ドット26bにより形成された光は前記光共振器を往復する際に誘導放出により増幅され、コヒーレント光となって前記低反射率ミラーARが設けられた端面から出射する。

【0039】また、図示は省略するが、前記クラッド層31と光導波層との間に回折格子を形成してもよい。この場合は、レーザダイオード40はいわゆるDFBレーザダイオードとなる。

【第3実施例】図5は、本発明の第3実施例による面発光型レーザダイオード50の構成を示す断面図である。ただし、図5中、先に説明した部分に対応する部分には同一の参照符号を付し、説明を省略する。

【0040】面発光型レーザダイオード50では、電極32がリング状に形成され、露出したGaAsキャップ層30の表面には反射防止膜ARが形成される。また、GaAs層24およびGaAs層28の代わりに、GaAsとAlGaAsを交互に積層しミラーとして作用する層24'、28'が形成され、層24'と層28'との間に、垂直な光共振器が形成される。一般に、層28'の積層数は、層24'の積層数よりも少なくする。

【0041】かかる構成では、垂直に整列した量子ドット26bにより形成された光は、前記光共振器を基板に垂直な方向に往復する際に誘導放出により増幅され、コヒーレント光となって、前記反射防止膜ARが設けられたキャップ層30の上主面より出射する。

【第4実施例】図6は、図3の実施例において、さらに熱処理を行なった場合に得られる本発明の第4実施例による発光ダイオード20'の構造を示す。かかる構造では、量子ドット26bが融合して物理的に単一の量子ドット26b'が形成されるが、かかる量子ドット26b'が共鳴するエネルギースペクトルはさらに鋭くなると考えられる。かかるアニールは、例えば 800°C で1分間行なえばよい。ただし、図6中、先に説明した部分には同一の参照符号を付し、説明は省略する。

【0042】以上の各実施例では、GaAs層上に形成されたInNAsの島により形成される量子ドットを考

えたが、本発明は、かかる特定の材料の組み合わせに限定されるものではなく、歪みヘテロエピタキシャル系を形成する他の半導体材料の組み合わせを使うことも可能である。例えば、図6の構成において、中間層26aをGaAsまたはAlGaAsとし、量子ドット26bをGaInNAsとしてもよい。

【0043】以上に説明した各実施例においては、中間層の組成は、基板との格子定数のずれが7%以下になるように設定するのが好ましい。以上、本発明を好ましい実施例について説明したが、本発明はかかる実施例に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載の要旨内において様々な変形・変更が可能である。

【0044】

【発明の効果】請求項1～12記載の本発明の特徴によれば、InAs/GaAs歪み系量子ドット構造において、InAs量子ドット中に少量のNを導入することにより、 $1.3\mu\text{m}$ 帯で動作する量子半導体装置あるいは量子半導体発光装置を構成することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】(A)、(B)は本発明の原理を示す図である。

【図2】(A)、(B)は本発明の原理を示す別の図である。

【図3】本発明の第1実施例による発光ダイオードの構成を示す断面図である。

【図4】本発明の第2実施例による端面発光型レーザダイオードの構成を示す断面図である。

【図5】本発明の第3実施例による面発光型レーザダイオードの構成を示す断面図である。

【図6】本発明の第4実施例による発光ダイオードの構成を示す断面図である。

【図7】従来の量子半導体装置の構成の概要を示す図である。

【図8】(A)、(B)は、図7の構成におけるPLスペクトルを示す図である。

【図9】Nを含むIII-V族化合物半導体系の格子定数とバンドギャップとの関係を示す図である。

【符号の説明】

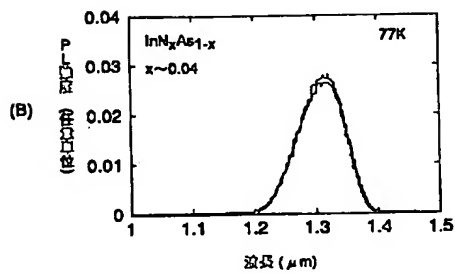
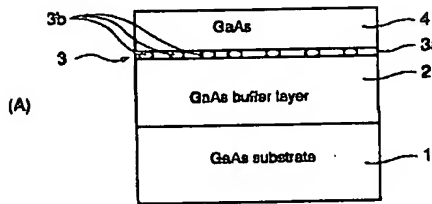
- 1, 21 基板
- 2, 22 バッファ層
- 3, 26 積層量子構造
- 3a, 26a 中間層
- 3b, 26b, 26b' 量子ドット
- 20 発光ダイオード
- 23, 29 クラッド層
- 24, 28 導波層
- 24', 28' 反射層
- 25, 27 非ドーブ層
- 30 キャップ層
- 31, 32 電極

33 保護膜

40 端面発光型レーザダイオード

【図1】

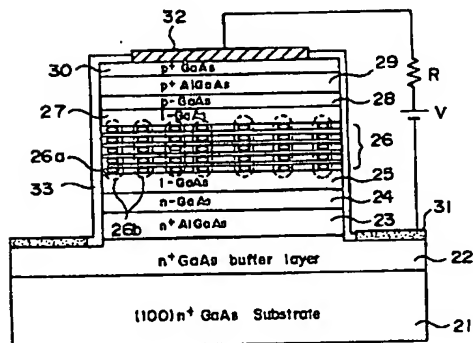
(A), (B)は本発明の原図を示す図



【図3】

本発明の図1実施例による発光ダイオードの構成を示す断面図

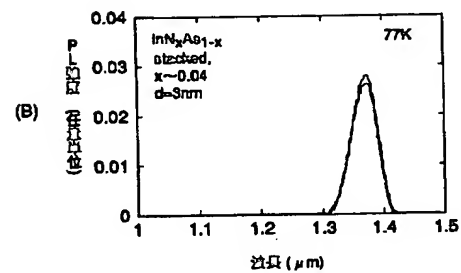
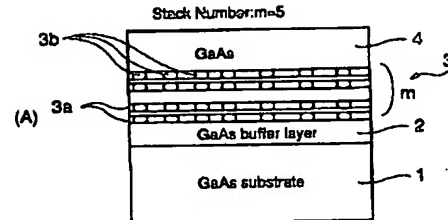
20



50 面発光型レーザダイオード

【図2】

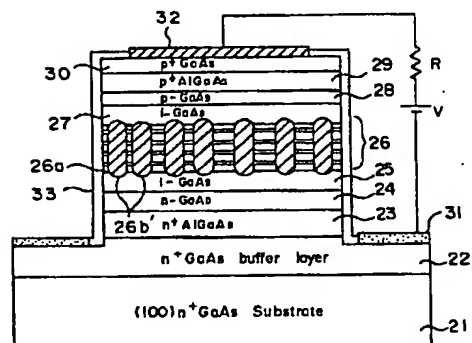
(A), (B)は本発明の原図を示す別の図



【図6】

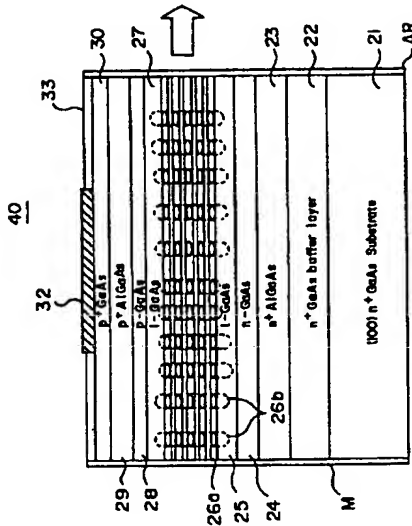
本発明の図4実施例による発光ダイオードの構成を示す断面図

20'



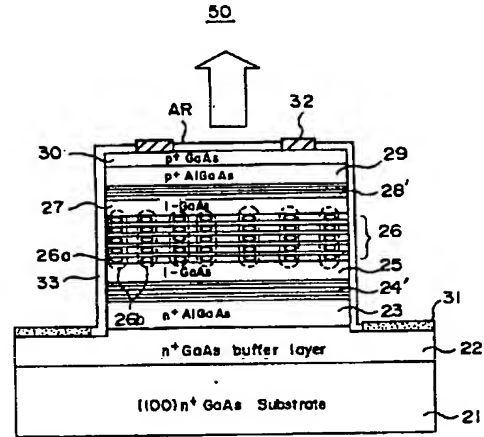
【図4】

本発明の第2実施例による端面発光型
レーザダイオードの構成を示す断面図



【図5】

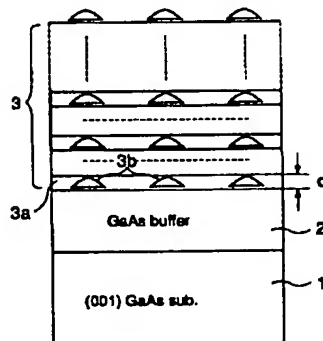
本発明の第3実施例による面発光型レー
ザダイオードの構成を示す断面図



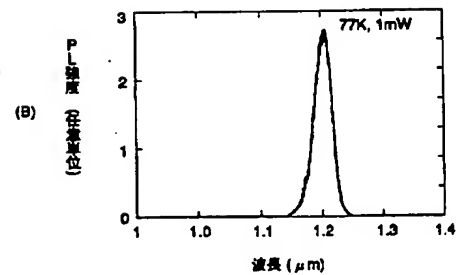
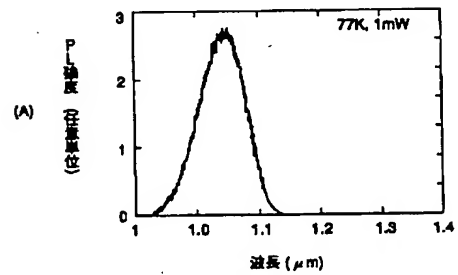
【図8】

【図7】

従来の量子半導体装置の構成の概要を示す図



(A), (B)は図7の構成におけるPLスペクトルを示す図



【図9】

Nを含むIII-V族化合物半導体系の格子定数と
バンドギャップとの関係を示す図

